

杨枫,许秋瑾,宋永会,等.滇池流域水生态环境演变趋势、治理历程及成效[J].环境工程技术学报,2022,12(3):633-643.

YANG F,XU Q J,SONG Y H,et al.Evolution trend, treatment process and effect of water ecological environment in Dianchi Lake Basin[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 633-643.

滇池流域水生态环境演变趋势、治理历程及成效

杨枫^{1,2},许秋瑾^{1*},宋永会^{1,2*},周兴玄¹,刘旭隆¹,严长安³,黄立成⁴

1.中国环境科学研究院

2.清华大学环境学院

3.云南省生态环境科学研究院

4.昆明市滇池高原湖泊研究院

摘要 为总结滇池治理成效并系统分析滇池水环境综合治理存在的问题,采用文献调研等方法梳理了滇池水质演变过程及治理与管理措施。将滇池的治理分为4个阶段:1)探索治滇阶段(1988—1995年),针对滇池水质显著下降问题,初步探索治滇的方式方法;2)工程治滇阶段(1996—2006年),针对污水排放量、工农业发展取水量增多的情况,采取以点源污染控制为主导的工程治理模式;3)系统治滇阶段(2007—2015年),2007年滇池被列入国家水体污染控制与治理科技重大专项(简称水专项),中央和地方协同治理,科学提出了以“六大工程”为主线的综合治污思路,以水专项科技成果为支撑,推动流域水体污染系统治理;4)精准治滇阶段(2016年至今),形成了“科学治滇、系统治滇、集约治滇、依法治滇”的新思路,加强精细化管理,推进科技攻关与成果应用,滇池水质显著提升。针对当前滇池水生态环境问题仍较严峻,存在水资源匮乏、流域面源污染负荷重、水生态受损等问题,提出“十四五”期间滇池治理应遵循流域水质目标管理的思路,统筹推进水资源、水环境、水生态治理与管理,加快环境基础设施建设,强化流域水体置换,恢复和维护湖泊生态系统功能。

关键词 滇池流域;水生态环境;治理历程;污染成因;成效分析

中图分类号: X524

文章编号: 1674-991X(2022)03-0633-11

doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210248

Evolution trend, treatment process and effect of water ecological environment in Dianchi Lake Basin

YANG Feng^{1,2}, XU Qiuji^{1*}, SONG Yonghui^{1,2*}, ZHOU Xingxuan¹,

LIU Xulong¹, YAN Chang'an³, HUANG Licheng⁴

1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Environment, Tsinghua University

3.Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences

4.Kunming Institute of Plateau Lake Dianchi

Abstract In order to summarize the effectiveness and systematically analyze the problems during the comprehensive treatment of Dianchi Lake water environment, the literature research and other methods were used to analyze the water quality evolution process and governance measures of Dianchi Lake. The treatment of Dianchi Lake was divided into four stages: 1) Exploring period (1988-1995), preliminary methods for Dianchi governance against the significant decrease of water quality were explored. 2) Engineering period (1996-2006), the point source pollution control was adopted as the leading governance model in response to the increase in sewage discharge and water intake for industry and agriculture. 3) Systemic treatment period (2007-2015), in 2007, Dianchi Lake was listed as the *Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment* (Water Projects for short). The central and local governments proposed a comprehensive pollution control idea, with the “six major projects” as the main line, supported by Water Projects, and the basin water pollution systematic treatment was

收稿日期:2021-06-22

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401-004)

作者简介:杨枫(1990—),男,助理研究员,主要从事流域水污染控制研究,13263331296@163.com

* 责任作者:1.许秋瑾(1970—),女,研究员,博士,主要从事环境生态与环境健康研究,xuqj@craes.org.cn

2.宋永会(1967—),男,研究员,博士,主要从事水污染控制与流域治理技术研究,songyh@craes.org.cn

promoted. 4) Precise treatment period (since 2016), a new idea of “scientific, systematic, intensive, lawful” was formed. By strengthening refined management, promoting the tackling of key scientific and technological problems and the application of R&D achievements, the water quality of Dianchi Lake had been improved significantly. However, the water ecological environment of Dianchi Lake was still grim, due to the serious problems such as the shortage of water resources, the heavy load of non-point source pollution in the basin, and the damage to the water ecology. The governance of Dianchi Lake during the 14th Five-Year Plan period should follow the idea of basin water quality target management, comprehensively promote the governance and management of water resources, water environment and water ecology, accelerate the water environmental infrastructure construction, strengthen the basin water replacement, and restore and maintain the functions of the lake ecosystem.

Key words Dianchi Lake Basin; water ecological environment; governance course; pollution causes; effectiveness analysis

作为国家重点治理“三河三湖”的难点，滇池治理一直备受关注，习近平总书记 3 次考察云南时都对滇池治理作出重要指示^[1]。2020 年 1 月 20 日，习近平总书记到星海半岛生态湿地察看滇池保护治理情况时，肯定了滇池治理的成效，并强调“滇池是镶嵌在昆明的一颗宝石，要拿出咬定青山不放松的劲头，按照山水林田湖草是一个生命共同体的理念，加强综合治理、系统治理、源头治理，再接再厉，把滇池治理工作做得更好”^[2]。

滇池作为典型高原湖泊，受气候变化与人类活动叠加影响，其治理历程对于我国湖泊治理具有重要示范意义^[3]。笔者通过梳理滇池流域治理与保护历程，总结不同阶段流域主要污染特征，分析滇池水生态环境的主要问题、变化趋势及治理与保护的重点。基于《滇池流域水污染防治“九五”计划及 2010 年规划》《滇池流域水污染防治“十五”计划（2001—2005 年）》《滇池流域水污染防治规划（2006—2010 年）及补充报告》《滇池流域水污染防治规划（2011—2015 年）》《滇池流域水环境保护治理“十三五”规划（2016—2020 年）》《滇池保护治理三年攻坚行动实施方案（2018—2020 年）》《滇池流域水环境保护治理“十四五”规划（2021—2025 年）》（公示稿），总结滇池治理与保护的经验和提出今后的治理措施和建议，以期为滇池流域水生态环境持续改善、经济高质量发展与水生态文明建设提供参考。

1 滇池流域概况

滇池属于长江流域金沙江水系，是云贵高原最大的淡水湖泊，被誉为“高原明珠”，是昆明市的“母亲湖”。全湖平均水深 5.3 m，湖岸线长约 163 km，湖水面积为 309.5 km²（水位 1 887.4 m 时），蓄水量为 15.6 亿 m³。湖体北部有横亘东西的海埂，把湖体分为外海（298.7 km²）和草海（10.8 km²）^[4-5]（图 1）。

滇池流域涉及昆明市五华、盘龙、官渡、西山、呈贡、晋宁 6 个城区及高新、经开、度假 3 个开发区，流域面积为 2 920 km²。流域有 29 条主要入湖河流纳入监测，其中 22 条流入外海，7 条流入草海^[6]。

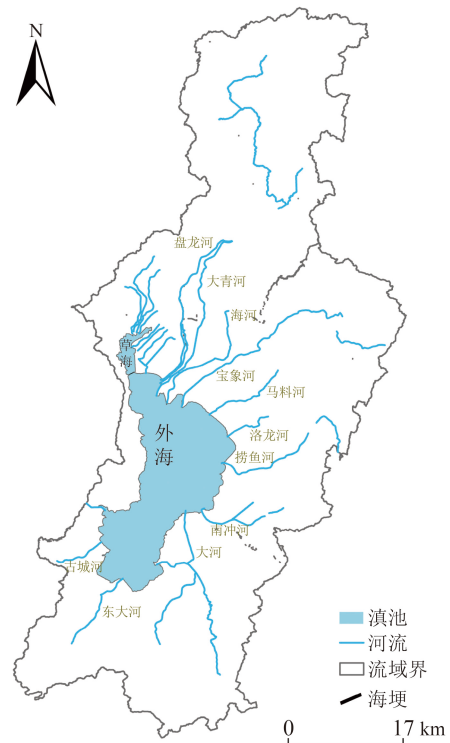


图 1 滇池流域水系

Fig.1 Basin water system of Dianchi Lake

2 滇池流域水环境、水资源及水生态演变趋势

2.1 水环境

20 世纪 60 年代，随着滇池流域工业兴起与人口聚集，工业废水和生活污水直排入湖，造成湖体水质受到污染，但污染程度尚未超出水体自净能力，直到 20 世纪 70 年代滇池水质仍维持在 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类^[7]。20 世纪 80 年代流

域社会经济蓬勃发展,点源污染负荷呈持续上升趋势^[8]。从20世纪90年代开始,滇池水质恶化为劣V类^[9],蓝藻水华频频暴发,滇池成为我国污染最严重的湖泊之一。

根据1989—2020年《中国生态环境状况公报》^[10]和1987—2020年昆明市生态环境监测站数据,绘制了1987—2020年滇池全湖水质变化趋势(图2)。从图2可以看出,1987—1992年,滇池整体水质由IV类转变为V类,重污染区域由最初的断桥、草海中心等滇池北部点位向南辐射。1993年起全湖水质持续恶化,除1996年罗家营监测点达到V类,1993—2015年全湖监测点水质均为劣V类。2016年,滇池水质出现明显好转,由持续13年的劣V类转变为V类(北部个别监测点位仍为劣V类),2018—2020年全湖平均水质稳定在IV类。

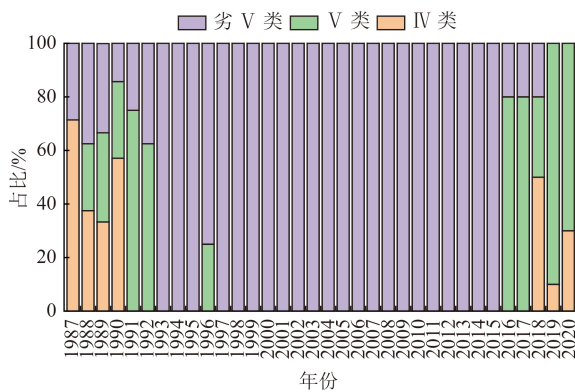


图2 1987—2020年滇池水质变化趋势

Fig.2 Water quality trends of Dianchi Lake from 1987 to 2020

2.2 水资源

由于地处长江、珠江与红河三大流域的天然“分水岭”上,滇池流域先天缺乏过境水源。加之湖体水浅、蒸发量大,水资源极度缺乏。1953—2008年,流域内多年平均实有水资源量为5.56亿 m^3 ^[11],人均水资源量为209 m^3 ,仅为全国人均水资源量的10.6%^[12-13],湖水补给系数远小于太湖和巢湖等平原湖泊,换水周期较长^[14-15]。在水利基础设施薄弱、流域水体污染严重等因素叠加影响下,滇池流域面临工程性缺水、资源性缺水和水质性缺水的巨大压力。

2007年,昆明掌鸠河引水供水工程实现通水,建成全长97.72 km的输水线路和日处理能力60万 m^3 的水厂及配套的配水管网,年调水2.5亿 m^3 ^[16]。2012年清水海项目通水,从寻甸县清水海水库引水,经63 km后注入昆明松华坝水库,年调水6 000万 m^3 ^[17]。这2项工程减轻了滇池的供水负担,使其水资源短缺问题得到一定程度的缓解^[18]。2013年底牛栏江—滇池补水工程投入运行,该工程由水源工程德

泽水库、提水工程干河泵站和长距离输水线路工程组成,总投资84.48亿元,调水距离为115.85 km,每年向滇池补水约6亿 m^3 ^[19]。2014年起滇池水量持续增加,水域面积年均增长接近1 km^2 ^[20]。整体来看,1988—2015年滇池年平均水位为1 886.94 m,较古滇池的自然状况下降10 m以上^[21],总体呈现低位波动状态。随着牛栏江—滇池补水工程正式向滇池补水,滇池水位达到高值^[22],流域河湖流量趋于满足生态流量的需求^[20]。

2.3 水生态

20世纪60年代之后,滇池流域水生态健康受到严重损害^[23-24]。1995年滇池因水土流失造成的淤积达5 610万 m^3 ,湖盆抬高0.47 m,淤积沉降速率大大超过了底栖生物、沉水植物的耐受能力^[25]。水生植物分布面积持续下降,从20世纪50—60年代占水面面积的90%,锐减到70年代的20%,再到80年代的12.6%,90年代之后逐步降至低于1%。水生植物从全湖水深4 m以内均有分布,演化到仅部分湖湾及较浅沿岸带有分布^[26]。与此同时,水华问题开始凸显,自1992年首次发生较大规模的微囊藻水华以来,滇池几乎年年暴发以微囊藻和水华束丝藻为主的蓝藻水华。遥感记录的水华影像面积超过25%的天数显示,滇池的水华持续时间从20世纪90年代开始增加,2005年已长达356 d。叶绿素a浓度变化趋势与水华接近,1998年达到最大值(0.11 mg/L),之后短期波动下降,2002年再次增加,达到0.093 mg/L^[27]。

2003年,昆明市在官渡、西山、呈贡、晋宁启动了湖滨生态湿地建设工程,2005年完成湖滨生态恢复与建设(面积3.3 km^2),建成草海生态示范区(面积3 km^2)。2006年起,生态修复与建设工程被正式纳入滇池治理“六大工程”,在滇池湖滨开展“四退三还”工作,确定了“以自然恢复为主,适当增加湿生乔木比例”的湖滨生态建设思路。生态建设以人工干预合理化,自然恢复最大化为原则,使湖滨带生态功能和生物多样性逐步恢复。水生植物覆盖率、物种多样性均有上升,水生态环境逐步改善^[28]。

以对湖泊水生态系统具有良好指示作用的高等沉水植物为例,相关学者统计了其数量变化情况(表1),1957—1963年为19种,1975—1977年为11种^[29-30],1995—2001年为10种^[31-32],2008年为8种^[33],2010年为7种^[34],总体呈现减少趋势^[35]。2016年,高等沉水植物种类上升为9种,覆盖度有所上升^[36]。蒋旻婧^[37]对滇池健康评价的结果也表明,2017年后滇池流域水生态健康等级由一般健康上升为健康状态。

表 1 1957—2016 年滇池不同时期沉水植物出现情况^[23-24,29-35]

Table 1 Higher submerged plants in Dianchi Lake in different stages from 1957 to 2016

沉水植物	1957—1963年	1975—1977年	1995—1997年	2001年	2008年	2010年	2016年
毛柄水毛茛(<i>Batrachium trichophyllum</i>)	○	×	×	×	×	×	×
水筛(<i>Blyxa japonica</i>)	○	×	×	×	×	×	×
金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>)	○	×	○	○	○	○	○
水蕨(<i>Ceratopteris thalictroides</i>)	○	×	×	×	×	×	×
黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)	○	○	○	○	×	○	○
穗状狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)	○	○	○	○	○	○	○
轮叶狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)	○	○	×	×	×	×	×
大茨藻(<i>Najas marina</i>)	○	○	○	○	×	×	×
小茨藻(<i>Najas minor</i>)	○	×	×	×	×	×	×
海菜花(<i>Otteliaacuminata</i>)	○	×	×	×	×	×	×
菹藻(<i>Potamogeton crispus</i>)	○	○	○	○	○	×	×
光叶子菜(<i>Potamogeton lucens</i>)	○	○	×	○	×	×	○
微齿眼子菜(<i>Potamogeton maackianus</i>)	○	×	○	○	○	○	○
马来眼子菜(<i>Potamogeton malaianus</i>)	○	○	○	○	○	○	○
蓖齿眼子菜(<i>Potamogeton pectinatus</i>)	○	○	○	○	○	○	○
穿叶子菜(<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	○	○	○	○	×	×	○
小眼子菜(<i>Potamogeton pusillus</i>)	○	○	×	×	○	×	×
黄花狸藻(<i>Utricularia aurea</i>)	○	×	×	×	×	×	×
苦草(<i>Vallisneria natans</i>)	○	○	○	×	○	○	○
出现种类数/种	19	11	10	10	8	7	9

注: ○表示出现, ×表示未出现。

3 滇池治理阶段划分及治理历程

1988年,针对日益严重的滇池污染问题,昆明市颁布实施了《滇池保护条例》^[38-39],启动滇池治理工作;1996年国家层面加大对滇池的治理力度与资金投入,全面开展工程治理项目,重点提升流域污水处理能力^[8];2007年,开始实施国家水体污染控制与治理科技重大专项(简称水专项)滇池项目,强调以科技成果支撑流域水体污染治理^[40-41],提出了“六大工程”的治理思路,滇池治理转为系统综合治理模式。经过中央和地方的共同努力,2016年起滇池水质显著提升,此后滇池治理更加突出科学性、精准性,注重机制创新^[42]。

基于此,将滇池治理历程划分为4个阶段(图3):1)探索治滇阶段(1988—1995年),该阶段针对滇池主要水环境问题,初步探索研究治滇的方式方法;2)工程治滇阶段(1996—2006年),该阶段昆明市城市化迅速发展,污水排放量及工农业发展取水量增多,导致滇池数次暴发严重的蓝藻水华,治理方面以点源污染控制与治理为主导;3)系统治滇阶段

(2007—2015年),该阶段启动实施了水专项,中央和地方协同治理,并汇聚大量学者对滇池治理进行研究,提出了以“六大工程”为主线的综合治污思路,以水专项科技成果为支撑,全面系统治理滇池;4)精准治滇阶段(2016年至今),该阶段流域生态环境逐步改善,滇池水质显著提升,从劣V类提升至IV类。

3.1 探索治滇阶段(1988—1995年)

3.1.1 治理思路

20世纪80年代城市发展和企业升级,滇池流域污染源由早先的以农业面源为主向以工业和城市生活源为主、农业面源为辅的结构转变^[25]。20世纪90年代滇池污染严重,建设项目侵占自然岸线,违规排放屡禁不止^[43]。该阶段滇池入湖污染源主要为工业点源、城市生活源和农业面源,治理思路主要是在保障经济发展的前提下控制工业点源^[44]。

3.1.2 工程措施

治理措施包括实施工业源达标排放、建设城市排水管网和污水处理厂、开展滇池流域绿化工程、对草海局部底泥进行疏浚等^[45]。1991年昆明第一水质净化厂建成并投产运行,处理规模为5.5万m³/d^[46],

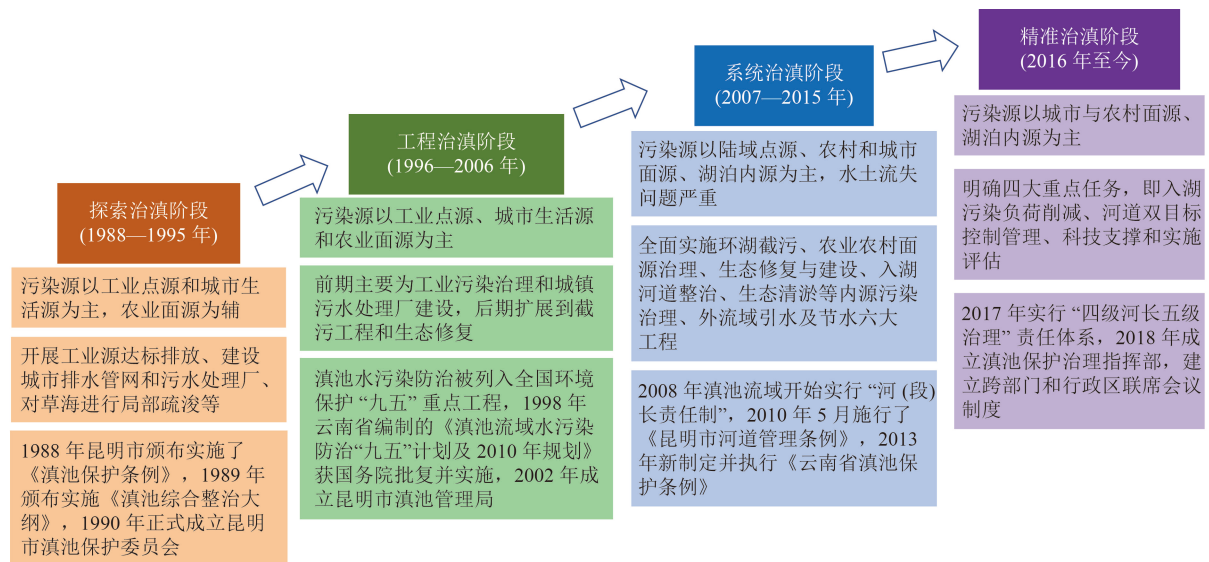


图3 滇池治理阶段划分

Fig.3 Stage division of Dianchi Lake governance

虽然其对城市点源污染起到的削减作用有限, 至1995年污染削减负荷不足产生总量的5%^[3], 但综合来看, 该时期的工作为后期点源污染治理奠定了重要基础。

3.1.3 管理措施

1988年昆明市颁布实施了《滇池保护条例》^[47], 1989年紧接着颁布实施了《滇池综合整治大纲》^[48], 1990年正式成立昆明市滇池保护委员会^[49], 启动治滇工作。

3.2 工程治滇阶段 (1996—2006年)

3.2.1 治理思路

1996—2000年流域社会经济飞速发展及人口快速增长, 加剧了滇池污染^[50]。该阶段工业点源、城市生活点源和农业面源污染成为滇池的主要污染来源。治理思路为全面开展工程项目, 重点提升污水处理基础设施水平^[8]。

3.2.2 工程措施

该阶段投资达115.4亿元, 工程内容前期主要为工业污染治理和城镇污水处理厂建设, 后期扩展到截污工程和生态修复, 但并未从根本上解决滇池的水污染问题^[51]。重视点源污染治理, 整治入滇河道, 进行城区排水管网改造, 推进工业清洁生产, 同步实施了滇池污染底泥疏浚、蓝藻清除、面山绿化、水生生态恢复等诸多工程^[52]。开展了达标排放“零点行动”^[53], 对流域重点工业企业进行拉网式检查, 工业污染得到一定控制; 逐步实施农村面源污染治理、内源污染防治及生态建设与恢复工程; 先后建成并投运昆明市第三、四、五、六水质净化厂, 呈贡县和晋宁县污水处理厂、北岸截污泵站, 进一步削减了入湖

污染负荷, 至2006年污染物入湖负荷削减为产生负荷的50%以内^[3], 工业点源控制初见成效。根据滇池流域规划及昆明市滇池管理局城镇污水处理厂运营情况简报, 梳理各阶段污水处理设施建设情况, 结果见表2。

3.2.3 管理措施

1996年第四次全国环保工作会议将滇池列为全国重点治理的“三河三湖”之一, 滇池水污染防治被列入全国环境保护“九五”重点工程^[54]。1998年云南省编制的《滇池流域水污染防治“九五”计划及2010年规划》获得批复并实施^[55], 以中期规划为指引的滇池治理工作机制逐步形成。2002年4月昆明市滇池管理局正式成立, 在机构设置上进一步强化管理和治理滇池的职能^[56]。

3.3 系统治滇阶段 (2007—2015年)

3.3.1 治理思路

该阶段, 滇池流域人口压力问题依旧突出, 流域城镇化水平进一步提高, 污染负荷产生量持续增长, 陆域点源、农村和城市面源、内源污染和水土流失问题严峻^[6]。随着“滇池流域水污染治理与富营养化综合控制技术示范项目”被列入水专项, 滇池治理进入新阶段: 治理的区域从湖盆区向全流域综合治理转变, 治理的重点从主要注重滇池本身向充分考虑内外有机结合和统一治理转变, 治理的时间从注重当前向着长期综合治理和保护转变, 治理的内容从注重工程治理向工程治理与生态修复相结合转变, 治理的投入机制从政府投入向政府投入与市场运作相结合转变, 治理的方式由专项治理向统筹城乡发展、转变发展方式、积极调整经济结构的综

表 2 滇池流域污水处理厂建设及运行情况

Table 2 Construction and operation of wastewater treatment plants in Dianchi Lake Basin

治理阶段	污水处理厂	试运营投产年份	设计日处理能力/万m ³	实际日处理量/万m ³ (2021年4月)
探索治滇阶段(1988—1995)	昆明市第一水质净化厂	1991	5.5	14.14
	昆明市第二水质净化厂	1995	10	11.00
工程治滇阶段(1996—2006年)	昆明市第三水质净化厂	1997	21	22.56
	昆明市第四水质净化厂	1997	6	5.92
	昆明市第五水质净化厂	2002	18.5	21.72
	昆明市第六水质净化厂	2003	13	13.81
	呈贡区污水处理厂	2004	1.5	1.36
	晋宁区污水处理厂	2005	1.5	1.27
	昆明市第七、八水质净化厂	2009	30	29.89
系统治滇阶段(2007—2015年)	昆明经济开发区倪家营水质净化厂	2011	5	4.39
	空港经济区(南片区)污水处理厂	2012	3	2.06
	昆明市第十水质净化厂	2013	15	10.27
	昆阳水质净化厂	2013	7.5	3.53
	古城水质净化厂	2013	4	0.69
	洛龙河水质净化厂	2013	5	1.36
	海口水质净化厂	2013	3	0.79
	白鱼河水质净化厂	2014	10	2.80
	白鱼口水质净化厂	2014	0.5	0.28
	高新区(马金铺)污水处理厂	2014	3	0.78
	昆明市第九水质净化厂	2015	10	6.52
	普照水质净化厂	2015	5	5.11
	洛龙河污水处理厂	2015	6	6.95
	淤泥河水质净化厂	2015	10	2.86
捞鱼河污水处理厂	2015	4.5	3.78	
精准治滇阶段(2016年至今)	昆明市第十一水质净化厂	2016	6	2.66
	昆明市第十三水质净化厂	2019	6	6.27

合治理转变^[54]。

3.3.2 工程措施

在水专项的科技支持下,滇池治理科学性、系统性不断加强,工业点源污染得到有效控制,入湖河流、内源污染受重视程度不断提升。提出了以“六大工程”为主线的综合治污思路,全面实施环湖截污、农业农村面源治理、生态修复与建设、入湖河道整治、生态清淤等内源污染治理、外流域引水及节水工程^[6];2009年新建了昆明市第七、八水质净化厂^[57],部分水质净化厂处理能力提升,处理工艺进一步优化,流域污水处理规模达到 $113.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水水质均达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准,入湖污染负荷大幅削减,至 2015 年污染物入湖总量占污染产生总量的 30% 以下^[3]。该阶段特别关注由大规模水华暴发引

起的水体黑臭现象。

3.3.3 管理措施

出台实施一系列重大制度举措,在制度上保障滇池水污染综合整治成效。2008 年昆明市成立了滇池流域水环境综合治理指挥部,统筹协调滇池治理工作。同年,昆明市对滇池流域主要入湖河流正式施行“河(段)长负责制”^[58],极大地调动了各方力量综合整治滇池入湖河流。2010 年 5 月施行了《昆明市河道管理条例》^[39],2011 年 3 月修订并执行《昆明市城市排水管理条例》。2013 年新制定并执行《云南省滇池保护条例》^[59],对滇池保护区域进行分级划定保护,明确了各区域管理重点,滇池治理系统性不断增强。

3.4 精准治滇阶段(2016 年至今)

3.4.1 治理思路

2016 年以来,滇池水质总体好转,2018—2020

年滇池全湖水质稳定达到Ⅳ类,但依然存在空间和时间上的不稳定性。该阶段对流域点源污染的控制能力显著提升,入湖污染负荷主要来自于面源污染、内源污染和水土流失。雨季点源、面源溢流污染已成为滇池流域主要污染源之一。该阶段滇池保护治理改变了过去“重点抓工程建设”的思路,形成了“科学治滇、系统治滇、集约治滇、依法治滇”的新思路,其实质是精准治滇。

3.4.2 工程措施

《滇池流域水环境保护治理“十三五”规划(2016—2020年)》开展了包含城镇污水处理及配套设 施、饮用水水源地污染防治、区域水环境综合整治、环境管理类 等共计 101 个项目,完成 95 个项目建 设。滇池保护治理“三年攻坚”行动(2018—2020 年)^[60],明确了四大重点任务,即入湖污染负荷削减、河道双目标控制管理、科技支撑和实施评估,共计实施项目 322 个,完成 310 个项目建 设。实施雨季溢流污染治理项目 58 个,完成 57 个项目建 设。关停滇池流域重点区域采矿采砂采石点 72 个,恢复治理面积 411.4 hm²,完成滇池面山造林补植及幼林抚育面积 2 666.7 hm²。开展滇池草海片区湿地建设和滇池湖滨湿地提升改造,完成湿地建设 162.8 hm²,实施捞渔河、斗南等湿地提升 243.7 hm²,完善古城河、白鱼河入湖口湿地布水系统等^[61]。

3.4.3 管理措施

2017 年滇池流域深化“河长制”,实行“四级河长五级治理”责任体系。2018 年成立滇池保护治理指挥部,依托河长制建立跨部门、跨行政区的联席会议制度。实施了 2 项创新性举措,一是对入滇河道实行“双目标责任制”,二是实施“河道生态补偿制”,进一步调动了各方的治滇积极性,机制性解决了滇池流域河道水质达标而湖体水质不达标 的难题,促进水环境持续改善。2020 年发布《昆明市城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》^[62](其 A 级标准各项指标,除总氮外均已达到Ⅲ类标准),根据各区域的水环境功能区划、水环境功能目标以及水质现状,实行分区分级的污染物排放限值,治滇精准性大幅提升。

4 滇池污染成因与治理成效

4.1 污染成因

4.1.1 历史成因

滇池至今约有 340 万年的漫长演变历史^[63],目前滇池已进入老龄化阶段,水面面积仅为古滇池的 25%,蓄水量仅为古滇池的 1.9%^[64]。滇池主要依靠集水区降水补充水量,汇水面积小,源近流短。周围

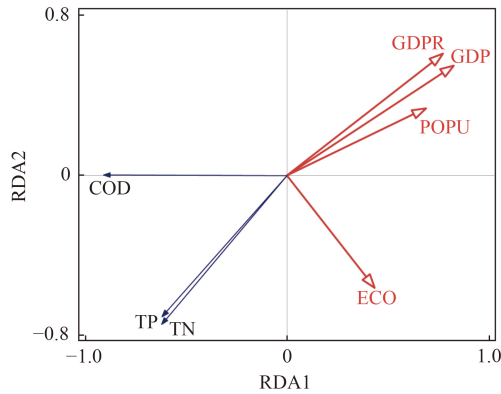
山地陡峭,地面冲刷和土壤侵蚀严重,入湖营养盐易于积聚^[65]。作为云贵高原典型的构造湖泊,滇池呈现封闭-半封闭湖泊的特征。滇池水资源先天不足的劣势,随着社会发展取水用水需求增大而日益凸显。牛栏江补水前(1997—2013 年),滇池平均出湖水量为 5.06 亿 m³,置换周期超过 500 d,湖流流速慢,成为周边污染物的“汇”,富营养化程度不断加剧。大量悬浮颗粒物沉积于湖底,使湖盆淤积严重^[66]。滇池作为典型的云贵高原湖泊,相较于东部平原湖泊生态系统脆弱性更加显著。加之滇池地区是地球化学元素磷的富集区,西岸磷矿自然淋溶致使水体磷本底值高于一般地区湖泊,且不断累积,加重了水体的富营养化水平。

4.1.2 经济社会发展的影响

过度开发导致湖泊流域水生态环境问题突出。滇池流域以占云南省 0.75% 的土地面积承载了全省约 23% 的国内生产总值(GDP)和 8% 的人口,是云南省人口密度和城镇化程度最高的地区,污染物排放量超过了水环境承载力。曹一梅^[11]的研究结果表明,自 20 世纪 80 年代以来滇池流域人口超载率大于 110%,属于水资源过载。湖盆区人口密集,土地、湖泊水域空间开发利用和水资源利用强度高。由于历史上大规模的围湖造田,导致湖泊水面和湖滨湿地丧失,野生动物生境遭到严重破坏;同时,山地砍伐、垦荒和矿产资源开发等人类活动加剧了流域水土流失,破坏了局部小气候环境,影响了水系流通与补给关系。另外,入湖河流水量大多被截留,生态用水遭大量挤占,导致河流渠化过度、生态净化功能丧失。上述人为干扰和破坏,导致滇池湖内水体污染物富集,水体污染程度不断加剧,进而改变了滇池水生态系统中生物代谢所需的物质条件,生产能力过剩导致生态结构失调,水质进一步恶化。

为分析影响滇池水质指标的主要因素,根据国家统计局、云南省水资源公报、云南省环境状况公报及昆明市环境监测中心的数据,利用 Canoco 软件绘制 2003—2019 年水质指标化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)与 GDP、人口、生态用水量等指标间的冗余分析(redundancy analysis, RDA),结果见图 4。由图 4 可知,滇池水体 TP、TN 指标具有极高的协同性,与人口、GDP 显著相关,即人口压力、经济发展程度是滇池富营养化元素氮、磷浓度变化的主因。COD 与 TP、TN 指标的协同性偏弱,生态用水量与 COD 具有相关性,与杨枫等^[67-68]近年来开展的滇池 COD 指标与溶解性有机物中难降解组分的研究结果相吻合。概括来说,氮、磷等营养元素受滇

池流域开发程度与水平的影响显著,无序扩张导致滇池富营养化程度加剧;COD 指标受污染负荷、水资源及有机物结构特征等多重影响,根本原因是人类社会经济发展导致的污染负荷超载、污染物结构复杂化及由于过度取水加剧的生态环境恶化。



注: POPU 为人口; ECO 为生态用水量; GDP 为国内生产总值; GDPR 为人均国内生产总值。

图 4 滇池多指标 RDA 分析

Fig.4 Multi-index RDA analysis of Dianchi Lake

4.1.3 监督管理体制制约

监督管理体制方面,滇池治理过程中存在体制不够健全,执法监管难以完全到位等问题。具体表现在:早期对环境的认识存在历史局限性,工业及生活废水排放监管缺位^[69],延续到近期的非法侵占滇池保护区、沿湖违规开发建设等现象暴露了部分地区或部门在滇池保护治理上态度不坚决,没有正确认识及处理好发展与保护的关系;流域管理与行政管理相结合的管理体制导致“多龙治水”,缺少统一规划。以部门为基础的横向管理导致职能重叠和空白并存,以行政区划为基础的纵向管理难以统筹流域自然单元和整体性^[70-71]。昆明市滇池保护委员会、昆明市滇池管理局、滇池管理综合行政执法局、滇池流域水环境综合治理指挥部、滇池保护治理“三年攻坚”行动指挥部等流域综合管理机构的先后成立,标志着滇池流域治理与管理逐步向科学化、规范化、法治化迈进。

4.2 滇池治理成效总结

滇池治理历程也是各类治理项目规划实施并取得成效的过程。治理项目按照实施内容主体可大致分为污染控制类(含污水处理厂及配套管网建设等)、生态修复类、资源调配类(主要指跨流域调水以及中水回用等)、监督管理类、研究示范类 5 个类型(图 5)。滇池治理投资整体呈现以污染控制类项目为主,生态修复类项目占比逐步提升的特征。污染控制是治滇各阶段的重点,探索治滇阶段污染控制

类项目投资占比约 48%,工程治滇阶段则高达 60%,系统治滇、精准治滇阶段占比虽有所下降,但仍占总投资的 50%。污染控制类项目的大力投入与顺利实施,保障了各治理阶段入湖污染负荷逐步削减,最终得到有效控制。生态修复类项目在探索治滇阶段的投资占比高达 26%,其中绿化工程投入超过 2 亿元;从工程治滇阶段开始,生态修复类项目投资占比逐渐加大;在水专项的示范带动下,生态修复类项目设置更加科学合理,到精准治滇阶段,其投资占比已达 45%,流域生态状况也随之改善。资源调配类项目从探索治滇阶段开始延续,至系统治滇阶段以牛栏江补水工程正式通水为重要节点,一定程度上解决了制约滇池流域生态环境的水资源短缺问题。监督管理类项目投入在精准治滇阶段显著提升,并在监测预警、污染区域识别等领域发挥了重要作用。技术示范类项目在工程治滇阶段主要是针对面源污染控制方面的研究,水专项的技术示范作用则贯穿了系统治滇及精准治滇 2 个阶段。

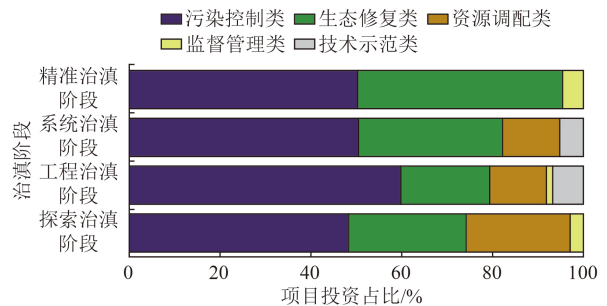


图 5 滇池各治理阶段投资情况

Fig.5 Investment in each governance stage of Dianchi Lake

1989—2020 年,滇池总体水质从重度污染变为轻度污染,实现了劣 V 类到 IV 类的显著提升^[72],入湖污染负荷大幅削减。2020 年滇池流域水质明显改善,全湖水质保持在 IV 类,主要水质指标中, COD 与总磷浓度达到 IV 类,其他指标达到或优于 III 类^[73];纳入国家考核断面的 12 条入湖河流全部达到滇池“十三五”规划水质目标要求,其中 II 类水质断面占 25.0%, III 类占 66.7%, IV 类占 8.3%^[10]。牛栏江累计向滇池补水 37.26 亿 m³,其中 2015—2019 年年补水量为 5.3 亿~6.0 亿 m³,滇池敏感生态需水量满足程度向优良迈进。滇池蓝藻水华发生频次快速下降,水生生物物种持续恢复。2020 年,滇池湖滨湿地植物物种数增加到 290 种,鱼类、鸟类分别为 23、140 种,海菜花等水生植物重现,天鹅、黑嘴鹳等对环境敏感的水禽数量大幅增加,银白鱼等濒危的滇池特有物种逐渐重现^[21]。

5 结论与建议

5.1 结论

(1)依据滇池流域水污染防治规划及相关文献调研,系统梳理了滇池污染及治理特征,以重要事件或时间为节点,将滇池治理历程分为4个阶段:1988—1995年为探索治滇阶段;1996—2006年为工程治滇阶段;2007—2015年为系统治滇阶段;2016年至今为精准治滇阶段。

(2)探索治滇阶段,主要针对滇池水质显著下降的问题,初步探索治滇的方式方法;工程治滇阶段,主要采取以点源污染控制为主导的工程治理模式削减入湖污染负荷;系统治滇阶段,中央和地方协同治理,科学提出了以“六大工程”为主线的综合治污思路,以水专项科技成果为支撑,推动流域水体污染的系统治理;精准治滇阶段,形成了“科学治滇、系统治滇、集约治滇、依法治滇”的新思路,精细化管理程度加强,科技攻关与成果得到广泛应用。

(3)经过30余年不懈的治理,及水专项实施以来的科技引领,近年来滇池水质显著提升,2018—2020年水质稳定在Ⅳ类,水体富营养化发展得到有效遏制,生态状况有所好转,加之牛栏江补水工程的顺利实施,流域生态基流趋于健康。

5.2 建议

滇池治理取得了显著成效,但生态用水量不足、城市雨水及再生水综合利用率低、水资源综合调度体系尚不健全、流域面源污染负荷重、水生态受损等问题仍然突出。“十四五”期间,滇池治理应遵循流域水质目标管理的思路,统筹推进水资源、水环境、水生态,加快环境基础设施建设,强化流域水体置换,恢复和维护湖泊生态系统功能:1)加强污染溯源及精准管控研究,关注难降解污染物的处理处置。减排重点领域向点多面广的合流制区域溢流污染、城市面源、农业农村面源、水土流失等方向拓展,加快开展片区雨污分流改造,建设雨水收集设施,削减面源污染负荷。2)提升引水工程稳定性,强化流域水体置换,进一步优化滇池流域水资源调配。持续推进外流域引水及节水工程,实行“以水定产”和“以水定居”的发展模式。加快实施污水处理厂尾水外排和资源化利用工程,鼓励再生水利用扩大供应范围和提高处理标准,实现滇池健康水循环。3)针对滇池水生态的薄弱环节,开展流域湿地修复、底泥污染释放控制、渔业资源捕捞、滇池水体生态潜能修复等关键技术的研发,以滇池生态修复为目标、改善生境为主线,推进生态湿地及野生生物

栖息地建设。4)完善体制机制,压实河长主要责任制,严格考核督查,凝聚企业、公民及社会组织合力,形成权责相当的网络化治理制度。充分发挥建成项目设施作用,定期开展回顾性评价,建立长效运管机制。完善水环境状况通报制度,保障人民群众知情权,营造共治共管的社会氛围。

参考文献

- [1] 新华社. 习近平察看滇池生态湿地[EB/OL]. 中央人民政府网. (2020-01-20)[2021-06-06]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-01/20/content_5471046.htm.
- [2] 段昌群. 科学治理实现绿色发展[N/OL]. 光明日报, 2020-09-04(06). [2021-06-06]. <https://epaper.gmw.cn/gmrb/html/2020-09/04/nbs.D110000gmr06.htm>.
- [3] 何佳, 徐晓梅, 杨艳, 等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 195-199.
HE J, XU X M, YANG Y, et al. Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 195-199.
- [4] DU L N, LI Y, CHEN X Y, et al. Effect of eutrophication on molluscan community composition in the Lake Dianchi (China, Yunnan)[J]. *Limnologica*, 2011, 41(3): 213-219.
- [5] WANG Y C, WANG W B, WANG Z, et al. Regime shift in Lake Dianchi (China) during the last 50 years[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(4): 1075-1090.
- [6] 刘瑞志, 朱丽娜, 雷坤, 等. 滇池入湖河流“十一五”综合整治效果分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(3): 95-100.
- [7] 刘瑞华, 曹喧林. 滇池20年污染治理实践与探索[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(6): 31-37.
LIU R H, CAO X L. Pollution treatment of practices of Dianchi Lake in the past twenty years[J]. *Environmental Science Survey*, 2017, 36(6): 31-37.
- [8] 和丽萍, 赵祥华. “九五”期间滇池流域水污染综合治理工程措施及其效益分析[J]. 云南环境科学, 2003, 22(3): 40-43.
HE L P, ZHAO X H. Comprehensive treatment engineering measures of water pollution and its benefit analysis in Dianchi Lake Basin during the period of the Ninth-Five-Year Plan[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2003, 22(3): 40-43.
- [9] 邓伟明, 雷坤, 苏会东, 等. 2008年滇池流域水环境承载力评估[J]. 环境科学研究, 2012, 25(4): 372-376.
DENG W M, LEI K, SU H D, et al. Assessment of water environmental carrying capacity in the Dianchi Lake Watershed in 2008[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(4): 372-376.
- [10] 生态环境部. 中国环境状况公报(1989—2020年)[A/OL]. [2021-06-06]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>.
- [11] 曹一梅. 滇池流域水资源开发潜力及承载力评价[J]. 水电能源科学, 2013, 31(11): 32-34.
CAO Y M. Evaluation of carrying capacity and potential of water resources development in Dianchi Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(11): 32-34.
- [12] 段颖. 滇池流域水资源潜力开发研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

- [13] 水利部. 中国水利统计年鉴2019[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [14] 王洪道. 中国湖泊水资源[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [15] 王洪道. 中国湖泊水量分析与评价[J]. 海洋与湖沼, 1987(1): 12-21.
WANG H D. The analysis and assessment of water quantities in lakes of China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1987(1): 12-21.
- [16] 李云, 黄光明. 掌鸠河引水供水、输水工程的设计研究与实施[C]//中国水利水电勘测设计协会. 调水工程应用技术研究与实践. 北京: 中国水利水电勘测设计协会, 2009.
- [17] 茶志福. 保护好清水海—湖清水[N]. 云南日报, 2021-07-22(7).
- [18] 余红, 王琼梅. 昆明: 多措并举保供水稳定[N]. 云南日报, 2021-05-14(5).
- [19] 郑冲泉, 白致昆. 牛栏江-滇池补水工程水源区与输水区水环境保护思考[J]. 水利水电技术, 2020, 51(增刊2): 342-345.
ZHENG C Q, BAI Z K. Consideration on water environments of water source area and water conveyance area of Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(Suppl 2): 342-345.
- [20] 吴阳, 吴雯雯, 刘春阳. 云南九大高原湖泊水域面积时空演变及影响因素分析[J]. 水资源开发与管理, 2021, 19(5): 53-58.
WU Y, WU W W, LIU C Y. Spatial-temporal evolution and influencing factors of water area of nine plateau lakes in Yunnan[J]. *Water Resources Development and Management*, 2021, 19(5): 53-58.
- [21] 杨一光, 杨桂华. 滇池生态环境的变迁及其演化趋势[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1985, 7(增刊1): 45-52.
YANG Y G, YANG G H. The changes of Yunnan Dian-Chi Lake's eco-environment and its developing trend[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)*, 1985, 7(Suppl 1): 45-52.
- [22] 贺克雕, 高伟, 段昌群, 等. 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988—2015年)及驱动因子[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1379-1390.
HE K D, GAO W, DUAN C Q, et al. Water level variation and its driving factors in Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong during 1988-2015[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1379-1390.
- [23] 郑丙辉, 郅永宽, 郑凡东, 等. 滇池流域生态环境动态变化研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(2): 16-18.
ZHENG B H, ZHI Y K, ZHENG F D, et al. Study on ecological environment dynamic change in Dianchi Lake Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(2): 16-18.
- [24] 戴丽. 滇池生态安全调查与评估[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2011.
- [25] 白龙飞. 当代滇池流域生态环境变迁与昆明城市发展研究(1949—2009)[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [26] 项希希. 滇池湖滨区湿地高等植物及其群落变化研究[D]. 昆明: 云南大学, 2014.
- [27] 侯鹏飞. 城镇化背景下滇池叶绿素a浓度时空变化特征研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- [28] 黄贝. 滇池流域森林资源现状分析与评价[J]. 林业建设, 2019(3): 66-70.
HUANG B. Evaluation and status analysis on forest resources in Dianchi Basin[J]. *Forestry Construction*, 2019(3): 66-70.
- [29] 云南省植物研究所. 云南植物志: 第一卷[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [30] 李恒. 云南高原湖泊水生植被的研究[J]. 云南植物研究, 1980, 2(2): 113-139.
LI H. A study on the lake vegetation of Yunnan plateau[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1980, 2(2): 113-139.
- [31] 赵晟, 吴学灿, 夏峰. 滇池水生植物研究概述[J]. 云南环境科学, 1999, 18(3): 4-8.
ZHAO S, WU X C, XIA F. On aquatic plant in Dianchi Lake[J]. *Yunnan Environmental Science*, 1999, 18(3): 4-8.
- [32] 杨赵平, 张雄, 刘爱荣. 滇池水生植被调查[J]. 西南林学院学报, 2004, 24(1): 27-30.
YANG Z P, ZHANG X, LIU A R. Study on aquatic vegetation change in Dianchi Lake[J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2004, 24(1): 27-30.
- [33] 沈亚强, 王海军, 刘学勤. 滇中五湖水生植物区系及沉水植物群落特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(增刊1): 111-119.
SHEN Y Q, WANG H J, LIU X Q. Aquatic flora and assemblage characteristics of submerged macrophytes in five lakes of the central Yunnan Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(Suppl 1): 111-119.
- [34] 宋任彬, 韩亚平, 潘珉, 等. 滇池外海沉水植物生态环境调查与分布特点分析[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(3): 61-64.
SONG R B, HAN Y P, PAN M, et al. Preliminary investigation and analysis on the submerged plants ecological environment and distribution characteristics in outer Dianchi Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2011, 30(3): 61-64.
- [35] 王寿兵, 徐紫然, 张洁. 滇池高等沉水植物50年变迁状况对生态修复的启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 1-5.
WANG S B, XU Z R, ZHANG J. Dynamic changes of higher submerged macrophytes in Dianchi Lake in recent 50 years and implication for ecological restoration[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6): 1-5.
- [36] 王琦, 高晓奇, 肖能文, 等. 滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 157-170.
WANG Q, GAO X Q, XIAO N W, et al. Distribution pattern of submerged macrophytes and its influencing factors of water environment in Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 157-170.
- [37] 蒋旻婧. 基于土地利用景观格局变化的滇池流域生态系统健康评价研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2019.
- [38] 郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 500-506.
GUO H C, SUN Y F. Characteristic analysis and control strategies for the eutrophicated problem of the Lake Dianchi[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(5): 500-506.
- [39] 曾文芳. 我国地方立法听证制度研究: 以《云南省滇池保护条例(草案)》听证会为个案研究视角[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [40] 王玮. 湖泊控藻水质目标过程分湖管理技术体系: 中国环境科学研究院水专项创新成果[J]. 科技成果管理与研究, 2017(9): 69-70.
- [41] 郑丙辉, 彭嘉玉, 胡小贞, 等. 2017年滇池外海水水质异常下降原因及对策[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(5): 465-472.

- ZHENG B H, PENG J Y, HU X Z, et al. The cause for abnormal water quality deterioration of Waihai of Dianchi Lake in 2017 and the countermeasures[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5): 465-472.
- [42] 滇池:水质明显改善 高原明珠重放光彩[J]. *财经界*, 2017(4): 50-56.
- [43] 赵娟. 阳宗海和滇池污染的比较研究[J]. *法制与社会*, 2009(13): 219-220.
- [44] 何佳, 徐晓梅, 陈云波, 等. 滇池流域点源污染负荷总量变化趋势及原因分析[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(6): 75-79.
- HE J, XU X M, CHEN Y B, et al. Change trend and reason analysis of point source pollution load of the Dianchi Lake Basin[J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(6): 75-79.
- [45] 昆明市滇池保护委员会. 关于滇池生态环境恶化及其综合治理方案的说明[J]. *云南环境科学*, 1993, 12(3): 11-17.
- [46] 郭丽珍. 污水处理厂巴登福/卡鲁塞尔氧化沟工艺运行分析: 以昆明市第一污水处理厂为例[J]. *贵州环保科技*, 2005, 11(2): 19-23.
- [47] 吕忠梅, 刘超. 论水污染防治立法的思维转换: 以《滇池保护条例》修订为例[J]. *河南师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2007, 34(2): 119-123.
- [48] 昆明市人民政府滇池综合整治大纲[J]. *云南环境科学*, 1993, 12(3): 81-87.
- [49] 张朝辉. 建立健全滇池保护机构 全面开展滇池综合整治工作[J]. *云南环保*, 1990, 9(1): 9-12.
- [50] 潘琨, 高路. 滇池流域社会经济发展对滇池水质变化的影响[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(6): 117-122.
- PAN M, GAO L. The influence of socio-economic development on water quality in the Dianchi Lake[J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(6): 117-122.
- [51] 郁亚娟, 王翔, 王冬, 等. 滇池流域水污染防治规划回顾性评估[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(4): 184-189.
- YU Y J, WANG X, WANG D, et al. Retrospective assessment on water pollution control and treatment plans of Dianchi Lake Watershed[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(4): 184-189.
- [52] 丁福荣. 关于滇池流域水污染防治规划的研究[J]. *资源节约与环保*, 2013(1): 24.
- [53] 中国工程院院士钱易: 治理30年, 水质好转了吗[J]. *环境经济*, 2014(6): 25.
- [54] 彭树恒, 于晓东, 胡元明. 滇池水环境综合治理成效、问题及建议[J]. *中国工程咨询*, 2012(1): 29-31.
- [55] 国务院. 国务院关于滇池流域水污染防治“九五”计划及2010年规划的批复[J]. *中华人民共和国国务院公报*, 1998(24): 942-944.
- [56] 高宏英. 滇池水环境法治研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [57] 万太寅, 蒋俊. 市政污水处理厂A²/O工艺中高、低污泥浓度与除磷脱氮效果的研究[J]. *环境与发展*, 2018, 30(9): 118-119.
- WAN T Y, JIANG T. Wastewater treatment in A²/O effect of nitrogen removal and phosphorus removal with MLSS on high or low[J]. *Environment and Development*, 2018, 30(9): 118-119.
- [58] 秘佳. 浅析河长制法律机制: 以滇池为例[J]. *法制博览*, 2019(9): 98-99.
- [59] 刘百军. 滇池保护史上的又一个里程碑: 《云南省滇池保护条例》开始施行[J]. *新华月报*, 2013(5): 80-81.
- [60] 昆明拟投141亿“三年攻坚”治滇池, 14条河道先装上监控[J]. *给水排水*, 2018, 54(3): 41.
- [61] 昆明市人民政府. 回眸“十三五”奋进新昆明第六场新闻发布会: 生态文明建设专题[EB/OL]. 云南省网上新闻发布厅. (2021-01-06)[2021-06-06]. <http://www.km.gov.cn/c/2021-01-06/3801637.shtml>.
- [62] 李英旭, 段燕惠, 杨洋. 昆明市某污水处理厂进出水水质特征分析[J]. *中国水运(下半月)*, 2020, 20(3): 260-262.
- [63] KORBEE N, CARRILLO P, MATA M T, et al. Effects of ultraviolet radiation and nutrients on the structure-function of phytoplankton in a high mountain lake[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2012, 11(6): 1087-1098.
- [64] 何锐. 滇池水域变迁考[J]. *云南林业*, 2016, 37(6): 24-27.
- [65] 刘勇, 朱元荣, 弓晓峰, 等. 滇池近代富营养化加剧过程的沉积记录[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(11): 1236-1242.
- LIU Y, ZHU Y R, GONG X F, et al. Sedimentary records of accelerated eutrophication in Dianchi Lake over the recent decades[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(11): 1236-1242.
- [66] 杨枫. 滇池COD特征及升高原因解析[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2017.
- [67] 杨枫, 王圣瑞, 郭伟, 等. 滇池入湖污水处理厂尾水COD降解过程及光谱特征[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(5): 558-564.
- YANG F, WANG S R, GUO W, et al. Spectroscopic analysis and degradation kinetics study of COD in sewage plant effluent into Dianchi Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(5): 558-564.
- [68] GUO W, YANG F, LI Y P, et al. New insights into the source of decadal increase in chemical oxygen demand associated with dissolved organic carbon in Dianchi Lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603/604: 699-708.
- [69] 付贲. 论我国流域水污染法制建设[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [70] 姜琦, 席海燕, 焦立新, 等. 我国湖泊管理的思考[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(1): 44-50.
- JIANG Q, XI H Y, JIAO L X, et al. Some thinkings on lake management in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(1): 44-50.
- [71] 韩韞超. 滇池保护“步步缩水”, 糊弄式整改“躲得过初一躲不过十五”[N]. *工人日报*, 2021-05-11(6).
- [72] 刘佳晨. 2021年政府工作报告[EB/OL]. 昆明市人民政府. (2021-02-20)[2021-06-06]. <http://www.km.gov.cn/c/2021-02-20/3840353.shtml>.
- [73] 咎娟娟. 2020年滇池全湖水质保持Ⅳ类[EB/OL]. 昆明信息港. (2021-03-29)[2021-06-06]. <https://www.kunming.cn/news/c/2021-03-29/13189916.shtml>. ◇